МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.791.052-192

Ю.Г. ЛЮДМИРСКИЙ, А.А. ПАРХОМЕНКО

МЕТОД ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ ПЕРЕХОДА ОТ ШВА К ОСНОВНОМУ МЕТАЛЛУ

Рассмотрен подход к анализу напряженного состояния конструкции, основанный на разделении напряжений на напряжения, связанные с макрогеометрией, конфигурацией конструкции в целом, и с микрогеометрией зоны перехода от шва к основному металлу. Представлены результаты повышения усталостной прочности штуцерных соединений путем изменения их конструктивного оформления, основанного на данном подходе.
Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, долговечность, напряжения, макрогеометрия и микрогеометрия конструкции.*

Введение. В различных изделиях машиностроения (барабанах котлов, сосудах давления, газгольдерах и др.) встречаются соединения труб, патрубков, штуцеров с корпусом изделия. Такие конструкции, условно назовём их «штуцер-лист» (рис.1), часто нагружаются гидростатическим давлением, при этом в стенках соединения возникает двухосное растяжение и изгиб. В зависимости от размеров штуцера и кривизны стенки сосуда доля мембранных составляющих и напряжений изгиба может быть различна. В случае малой частоты нагружения и высокого уровня повторно-действующих нагрузок в таких конструкциях можно рассматривать процессы их разрушения с позиций малоцикловой усталости. При проектировании указанных изделий большое внимание уделяется оценке их прочности. Несмотря на это они часто становятся источником разрушения. Причин преждевременных разрушений соединений «штуцер-лист» много. В данной работе рассматривается, на наш взгляд, наиболее главная причина – это высокие рабочие напряжения в зоне перехода от шва к основному металлу.

Постановка задачи и ее решение. Поскольку физические и металлургические процессы, протекающие при сварке, не поддаются моделированию в полном объеме, было принято решение о проведении испытаний на натурных сварных узлах при полном сохранении технологии сварки и основных параметров геометрии соединения. Исследования малоцикловой усталости сварных соединений проводили на образцах в виде дисков диаметром 550 мм толщиной 30 мм на установке УДИ-25 [1, 2]. В этих установках образцы в виде дисков шарнирно закрепляются по контуру, нагружаются гидростатическим давлением масла. Под действием гидростатического давления диск прогибается, в нём возникает осесимметричный изгиб. На внутренней поверхности диска возникают напряжения сжатия, на внешней поверхности образца - напряжения растяжения и на неё воздействует коррозионная среда – 3%-ный водный раствор хлористого натрия. Испытания образцов проводились при повторно-статическом отнулевом нагружении с максимальными напряжениями в цикле 900 МПа с частотой 10 циклов/мин.

Следует отметить, что максимальные напряжения возникают в центральной части образцов. Большие размеры исследуемой зоны на поверхности образцов способствуют более полному протеканию коррозионных процессов и увеличивают статистическую вероятность возникновения и развития разрушения, что в целом приближает условия испытания к реальным условиям работы нагруженных корпусных конструкций.

Для всех сварных соединений в качестве основного металла была взята конструкционная хромоникельмолибденовая сталь. Ручная дуговая сварка выполнялась аустенитными электродами ЭА 981/15. Поскольку зарождение усталостного разрушения происходит со стороны растянутых волокон, напряженное состояние исследовали на растянутой поверхности образца. Напряжения измеряли тензорезисторами с базой 5 мм и с базой 1 мм в зоне локализации напряжений, а также определяли расчетным путем методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса ANSYS.

На рис.1 показана конструкция штуцерного соединения с симметричными угловыми швами, на рис.2 представлено распределение радиальных напряжений на растянутой поверхности этого соединения. Распределение напряжений в металле шва и штуцере не приведены, так как по мере роста толщины сечения конструкции, напряжения в сварном шве и в штуцере резко падают. По оси абсцисс за ноль выбрана точка перехода от шва к основному металлу. Столь резкое повышение напряжений в районе сварного соединения можно объяснить концентрацией напряжения в зоне перехода от шва к основному металлу. Для детального анализа факторов, влияющих на концентрацию напряжений, целесообразно выделить две составляющие:

- составляющую, обусловленную геометрией локальной зоны перехода от шва к основному металлу, – «локальная концентрация»;
- составляющую, обусловленную геометрией сварного соединения, – «глобальная концентрация».

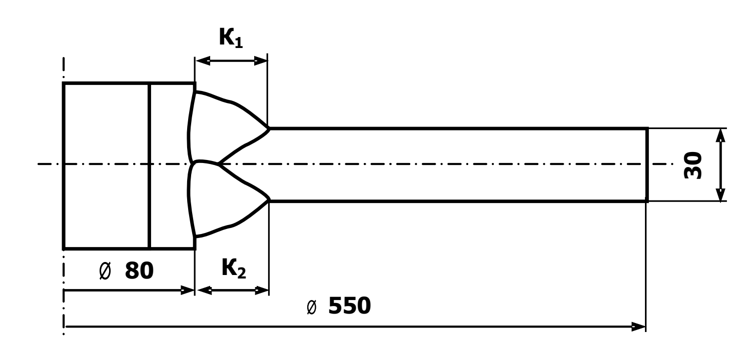


Рис.1. Конструкция соединения с симметричными угловыми швами

При всей условности такого подхода к анализу напряженного состояния он позволяет найти пути раздельного влияния на каждую составляющую и расширяет возможности в поисках методов снижения концентрации напряжений за счет изменения конструктивных параметров соединения и технологических приемов.

Такой подход упрощает методы расчетной оценки долговечности сварных конструкций, основанных на результатах экспериментов, поскольку позволяет выделить составляющую, обусловленную сваркой.

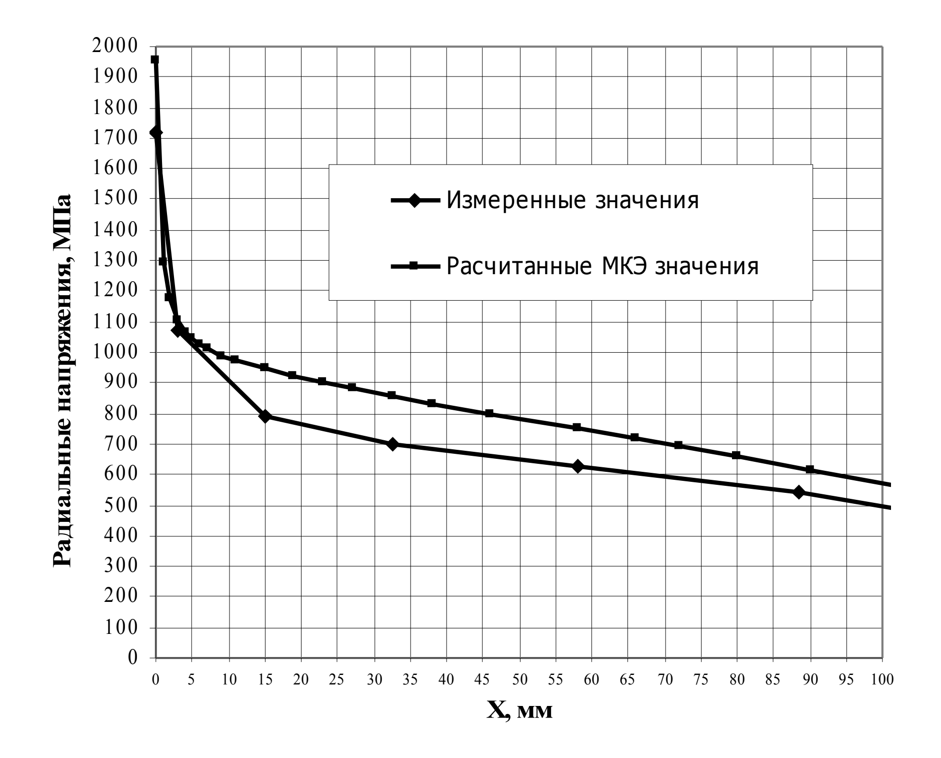


Рис.2. Распределение радиальных напряжений на растянутой поверхности соединения с симметричными угловыми швами (см.рис.1); рабочее давление 85 атм

Схематично предлагаемый подход можно представить следующим образом: из сварной конструкции «вырезают ячейку», в которой локальная геометрия и локальные свойства полностью зависят от технологии сварки. Эта «ячейка» ответственна за стадию зарождения усталостного разрушения. Остальная часть сварного соединения подобно внешней нагрузке влияет на уровень напряжений в «ячейке». Таким образом, получив характеристики усталостной прочности для любого сварного соединения, содержащего такую «ячейку», можно путем пересчета распространить их на другое сварное соединение, отличающееся глобальной геометрией сечения.

Рассмотрим практическую реализацию такого подхода. Уменьшить глобальную составляющую концентрации напряжений на растянутой поверхности образца можно путём увеличения величины катета со стороны сжатых волокон. Локальную составляющую напряжений можно регулировать путём изменения радиуса перехода от шва к основному металлу.

Оценим возможности регулирования глобальной составляющей напряжений за счет увеличения катета шва со стороны сжатых волокон соединения. Конструкция соединения представлена на рис.3, распределение напряжений на растянутой поверхности этого соединения – на рис.4. Характер эпюр можно регулировать соответствующим изменением размера

катета подкрепляющего шва, для получения напряжений требуемого уровня, а следовательно, требуемой долговечности сварного соединения и конструкции в целом.

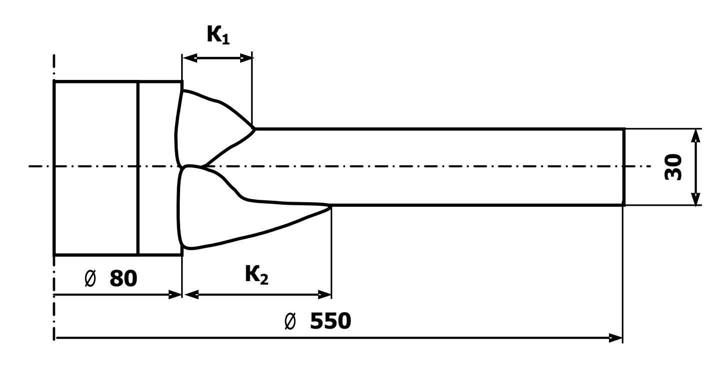


Рис.3. Конструкция соединения с подкрепляющим швом $K_2 = 2\ K_1$

Локальную составляющую напряжений можно изменить за счет технологических приемов. Это может быть изменение радиуса перехода от шва к основному металлу путем механической обработки или путем повторного расплавления металла в этой зоне дугой в аргоне с поперечными колебаниями неплавящегося электрода. Второй путь более технологичный.

В экспериментах использовали следующие режимы сварки: диаметр вольфрамового электрода 3 мм; сварочный ток 120 А; напряжение на дуге 8-10 В; скорость сварки 8 м/ч; частота поперечных колебаний электрода 90 мин$^{-1}$; амплитуда колебаний – 10мм. Такой режим обработки позволяет получать радиус зоны перехода 8-10 мм.

Следует отметить, что изменение локальной геометрии зоны перехода и глобальной геометрии сварного соединения приводит к существенному снижению уровня напряжений в предполагаемой зоне усталостного разрушения (рис.4).

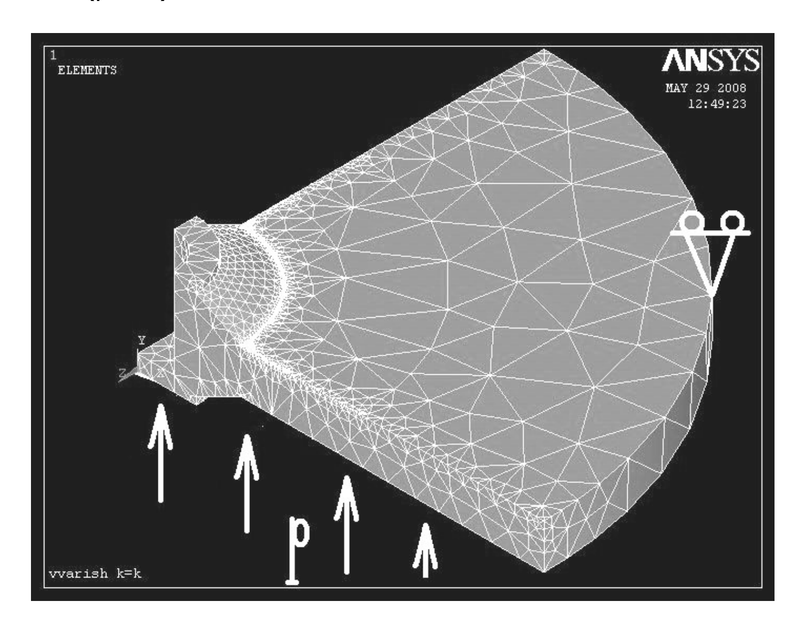


Рис. 4. Схема нагружения образцов и сетка конечных элементов

Результаты расчета, полученные методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS, подтверждают экспериментально полученные эпюры напряжений. Схема нагружения образцов и сетка конечных элементов представлена на рис.4, результаты расчета на рис.5.

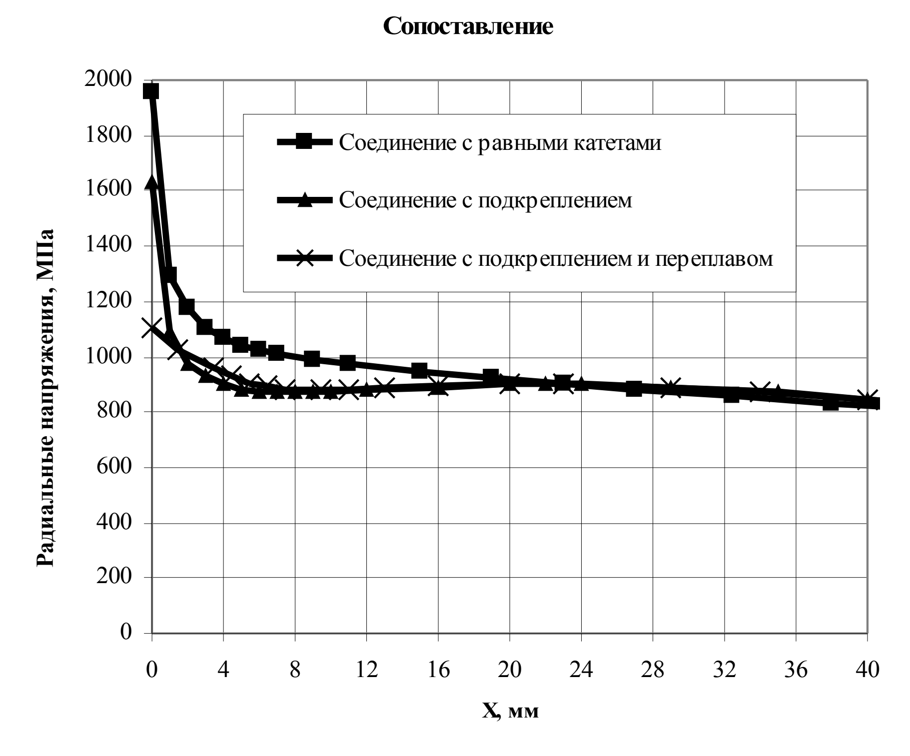


Рис.5. Сводный график расчета МКЭ соединений «штуцер-лист»

Проведенные исследования образцов на малоцикловую усталость (см. таблицу) показывают, что долговечность сварных соединений по зарождению разрушения с подкрепляющим швом в 1,5-3 раза выше, чем у соединений с равными катетами, а по моменту потери герметичности до 1,5 раз выше.

Результаты исследования образцов на малоцикловую усталость

Номер обр.	Эскиз образца	Кол-во циклов до наступления этапа разрушения		Примечание
		I	II	
1 2 3	Рис. 1.	400 400 300	7500 5600 5800	Соединения с симметричными угловыми швами
4 5 6	Рис. 2.	800 400 500	8800 7000 7500	Соединения с подкрепляющим швом
7 8 9	Рис. 2.	500 1300 2100	11900 12400 15200	Соединения с подкрепляющим швом, зона перехода к основному металлу переплавлена в аргоне
10 11	Основной металл	2100 3800	15900 14200	

Примечание: I – выявление трещин на линии сплавления; II – нарушение герметичности.

Для соединений с подкрепляющим швом после переплава зоны перехода от шва к основному металлу в среде аргона долговечность сварных соединений по зарождению разрушения в 5-7 раз выше, чем у соединений с равными катетами, а по моменту потери герметичности аналогичны долговечности основного металла. Полученные результаты хорошо согласуются с данными работ [1, 3, 4, 5].

Результаты эксперимента показывают, что процесс разрушения сварного соединения «штуцер-лист», выполненного по базовой технологии (см. рис.1), начинается на ранней стадии нагружения как со стороны растянутых, так и со стороны сжатых волокон. Характерным для малоцикловой усталости сварных соединений «штуцер-лист» является практически одновременное зарождение большого числа трещин в наиболее грубых переходах от металла шва к основному металлу листа на линии сплавления. Дальнейшее развитие разрушения происходит путем увеличения отдельных трещин, появления новых и их слияния в одну магистральную. Особенностью развития разрушения таких соединений являются то, что к моменту потери герметичности сварного соединения приводит совместное развитие трещин, как с растянутых, так и со сжатых волокон. Однако скорость развития трещин со стороны сжатых волокон ниже, чем со стороны растянутых волокон. Обычно трещины со стороны сжатых волокон к моменту потери герметичности успевают пройти приблизительно 10-12% толщины основного металла.

В начальный период нагружения наблюдается в основном увеличение длины трещины при незначительном развитии ее в глубину. Последнее подтверждается крайне малым раскрытием круговой магистральной трещины в начальный период ее формирования.

Предложенная конструкция, по сравнению с базовой, имеет следующие преимущества:

- трещины на растянутых волокнах возникают значительно позже, поскольку уменьшено напряженно-деформированное состояние в зоне перехода от шва к основному металлу;
- возросла сопротивляемость развитию разрушения, так как источники зарождения разрушения находятся в разных плоскостях. На объединение таких трещин требуется значительно большее количество циклов нагружения.

Выводы:

1. Представленные результаты свидетельствуют о целесообразности применения подхода к анализу напряженного состояния, основанного на разделении поля напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу на составляющие, связанные с макрогеометрией, конфигурацией конструкции в целом и с микрогеометрией зоны перехода от шва к основному металлу.

2. Данный подход позволяет выделить составляющую, «ячейку», в которой локальная геометрия и локальные свойства полностью зависят от

технологии сварки. Эта составляющая, связанная с микрогеометрией зоны перехода от шва к основному металлу, ответственна за стадию зарождения усталостного разрушения и не зависит от геометрии сварного соединения в целом. Геометрия остальной части сварного соединения влияет на уровень напряжений в «ячейке» подобно внешней нагрузке. Таким образом, получив характеристики усталостной прочности для любого сварного соединения, содержащего такую «ячейку», можно путем пересчета распространить на другое сварное соединение, отличающееся глобальной геометрией сечения.

3. Рассмотренный подход позволяет найти пути раздельного влияния на каждую составляющую, расширяет возможности в поисках методов снижения напряженно-деформированного состояния конструкции за счет изменения конструктивных параметров соединения и технологических приемов и позволяет получить требуемую долговечность конструкции.

4. На примере сварного соединения «штуцер-лист» показана возможность повышения долговечности в 1,5-3 раза за счет целенаправленного изменения макрогеометрии соединения.

5. Теоретический и экспериментальный анализ распределения напряжений на поверхности соединений типа «штуцер-лист» с подкрепляющим швом наглядно доказывает возможность раздельного управления напряженным состоянием в зоне предполагаемого разрушения за счет изменения глобальной и локальной геометрии конструкции.

Библиографический список

1. Исследование малоцикловой усталости сварных соединений типа «вварыш-лист»/ Ю.Г.Людмирский, В.В. Напрасников и др.: отчет о НИР, хоздоговор № 1173/792-77 /РИСХМ. – Ростов н/Д. – 1978.

2. *Лукьянов В.Ф., Людмирский Ю.Г., Напрасников В.В.* Испытание элементов корпусных конструкций при двухосном напряженном состоянии // Заводская лаборатория. – 1986. – №7. – С. 63-65.

3. *Лукьянов В.Ф., Людмирский Ю.Г., Напрасников В.В.* Малоцикловая усталость сварных штуцерных соединений // Сварочное производство. – 1982. – №12. – С.26-28.

4. *Лукьянов В.Ф.* Влияние геометрической неоднородности сварных швов на долговечность штуцерных соединений / В.Ф. Лукьянов, Ю.Г. Людмирский, В.В. Напрасников // Надежность и долговечность машин и сооружений. – Киев. – 1983. – Вып. 4. – С.63-67.

5. *Лукьянов В.Ф., Напрасников В.В. и др.* Долговечность сварных соединений в малоцикловой области при двухосном напряженном состоянии // Автоматическая сварка. – 1989. – №6. – С.16-20.

Материал поступил в редакцию 02.06.08.

U.G. LUDMIRSKIY, A.A. PARKHOMENKO

METHOD OF ESTIMATION STRESSES CONDITION IN FRONT OF THE TOE

In article the approach to the analysis of an intense condition of a design based on division of stress on stress connected with the structural stress, a configuration of a design as a whole and with microgeometry in front of the toe, the notch stress is considered. Results of increase of fatigue durability pipe connections are submitted by change of their constructive form based on the given approach.

ЛЮДМИРСКИЙ Юрий Георгиевич (р.1940), профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» ДГТУ, доктор технических наук (2002). Окончил РИСХМ (1962) по специальности «Оборудование и технология сварочного производства».
Научные интересы лежат в области роботизации сварочного производства, разработки способов снижения сварочных деформаций, напряжений и повышения работоспособности сварных конструкций.
Автор более 120 работ.

ПАРХОМЕНКО Александр Александрович (р.1983), аспирант кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» ДГТУ. Окончил ДГТУ (2006).
Научные интересы связаны с технологией производства сварных конструкций, надежностью сварных соединений и мультимедийными технологиями.
Автор 9 научных работ.